

Jornadas de Automática

Inspección robótica autónoma para reconstrucción tridimensional de grandes estructuras espaciales

Arturo Ríos¹, Juan de Dios Alfaro¹, David Rodríguez-Martínez*, Carlos Pérez-del-Pulgar

Laboratorio de Robótica Espacial, Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Mecatrónica y Sistemas Ciberfísicos, Universidad de Málaga.

To cite this article: Ríos, A., Alfaro, J.D., Rodríguez-Martínez, D., Pérez-del-Pulgar, C. 2026. Autonomous robotic inspection for three-dimensional reconstruction of large space structures. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13806>

Resumen

La inspección de infraestructuras espaciales exige sistemas autónomos que no dependan de marcadores predefinidos. Para ello, este trabajo propone un sistema de inspección robótica autónomo y sin marcadores basado en la planificación de trayectorias envolventes. La arquitectura se fundamenta en un gemelo digital desarrollado en ROS 2 (empleando MoveIt, RViz y Gazebo) y se valida experimentalmente sobre un manipulador Kinova Gen 2 con sensores integrados. Durante las trayectorias se realiza una captura multimodal RGB-D sincronizada, evaluando diversas técnicas de reconstrucción 3D para seleccionar la óptima. Los modelos geométricos tridimensionales generados permiten el diagnóstico posterior de fallos mecánicos y térmicos. Los resultados demuestran la viabilidad técnica de esta integración para la inspección en entornos espaciales.

Palabras clave: Robótica aérea y espacial, Percepción y sensado robótico, Navegación autónoma, Planificación de tareas y movimientos, Aprendizaje y adaptación robótica

Autonomous robotic inspection for three-dimensional reconstruction of large space structures

Abstract

Space infrastructure inspection demands autonomous systems that do not rely on predefined markers. To this end, this paper proposes an autonomous, markerless robotic inspection system based on enveloping trajectory planning. The architecture is built upon a digital twin developed in ROS 2 (using MoveIt, RViz, and Gazebo) and experimentally validated on a Kinova Gen 2 manipulator. During these trajectories, synchronized multimodal RGB-D data acquisition is performed, evaluating various 3D reconstruction techniques to select the optimal approach. The resulting three-dimensional geometric models enable the subsequent diagnosis of mechanical faults. The findings demonstrate the technical feasibility of this integration for inspection tasks in space environments.

Keywords: Aerial and space robotics, Robotic perception and sensing, Autonomous navigation, Task and motion planning, Robotic learning and adaptation

1. Introducción

Las grandes estructuras espaciales, o *Large Space Structures* (LSS), son infraestructuras de grandes dimensiones diseñadas para operar en el espacio, normalmente en órbita. Dentro de este término se incluyen estaciones espaciales,

grandes antenas, paneles solares desplegables o futuros hábitats orbitales. Debido a su tamaño, complejidad y diversidad de componentes, su inspección y mantenimiento constituyen tareas especialmente relevantes.

Actualmente, estas operaciones se realizan de forma muy

*Autor para correspondencia: david.rm@uma.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

¹Estos autores han contribuido por igual a este trabajo.

planificada y con una fuerte dependencia de la intervención humana, herramientas específicas, interfaces de acoplamiento, marcadores o puntos de acceso previamente identificados. Aunque este enfoque resulta adecuado para infraestructuras conocidas, puede volverse limitado en estructuras extensas, complejas o no preparadas para la inspección robótica. Por ello, resulta necesario desarrollar sistemas más autónomos y flexibles, capaces de operar sin depender exclusivamente de marcadores, interfaces específicas o trayectorias completamente predefinidas.

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto ECHO2 (*End-to-End Control for Handling Operations in Orbit*), integrado en la campaña LATTICE (*Large Space Structure Construction, Maintenance, and Recycling Technologies*) de la Agencia Espacial Europea (ESA). Esta iniciativa impulsa el desarrollo de tecnologías para la construcción, mantenimiento y reciclaje de grandes estructuras espaciales, con el objetivo de avanzar hacia infraestructuras orbitales más reutilizables, eficientes y sostenibles. Dentro de este marco, ECHO2, desarrollado en colaboración entre la Universidad de Málaga, la ESA y Sirin Orbital Systems, busca reducir la dependencia de interfaces estandarizadas y permitir operaciones robóticas resilientes y escalables en entornos orbitales no estructurados.

Alineado con estos objetivos, en este trabajo se propone una plataforma experimental para la inspección autónoma de grandes estructuras espaciales mediante un manipulador robótico equipado con un sistema de percepción multimodal. El flujo desarrollado combina la adquisición de datos desde el efector final del robot, la planificación de puntos de inspección, la generación de trayectorias libres de colisiones y la posterior reconstrucción tridimensional de la estructura inspeccionada.

Las principales contribuciones de este trabajo son:

- El diseño e integración mecánica de un sistema de percepción multimodal compuesto por una cámara RGB-D, una cámara térmica y un sensor LiDAR montados sobre el efector final del manipulador Kinova Gen 2.
- La calibración del sistema de adquisición, incluyendo la calibración intrínseca de la cámara (Zhang, 2000) y la calibración extrínseca de tipo *eye-in-hand* (Tsai and Lenz, 1989; Espósito et al., 2017), para relacionar los sensores con el sistema de referencia del manipulador.
- El desarrollo de un flujo de inspección autónoma que incluye la delimitación del volumen de interés, la generación de puntos de inspección, la planificación de trayectorias libres de colisiones mediante MoveIt (Coleman et al., 2014) y la captura de datos asociada a la pose del robot.
- La construcción de un gemelo digital de alta fidelidad en Gazebo para ensayar estrategias de exploración y comprobar la prevención de autocolisiones antes de su ejecución sobre el sistema real.
- La evaluación de distintas técnicas de reconstrucción 3D, incluyendo COLMAP, NeRF, 3D Gaussian Splatting, NeuS, CasMVSNet y MAST3R, con el objetivo de seleccionar el método más adecuado para su integración en el banco de pruebas propuesto.

2. Estado del arte

El mantenimiento y la inspección en órbita son líneas clave para extender la vida útil de satélites y ensamblar nuevas infraestructuras. Aunque demostraciones como MEV-1 y MEV-2 (Roa et al., 2024) han mostrado la viabilidad del servicio en órbita, suelen basarse en objetivos conocidos, procedimientos altamente planificados e interfaces cooperativas. De forma similar, iniciativas como GITAI, MOSAR, PULSAR o MIRROR (Letier et al., 2019; Roa Garzon et al., 2022; Deremetz et al., 2023) exploran el uso de robótica espacial, pero todavía dependen en gran medida de arquitecturas cooperativas, puntos de agarre definidos o marcadores fiduciarios.

La reconstrucción tridimensional permite representar la estructura inspeccionada, apoyar la selección de puntos de vista y verificar la cobertura sin depender de marcadores, modelos CAD precisos o interfaces predefinidas. Aunque métodos como COLMAP, NeRF y 3D Gaussian Splatting han mostrado potencial en flujos robóticos compatibles con ROS 2 (Martínez-Petersen et al., 2026), su rendimiento puede degradarse en escenas no estructuradas, con baja textura, reflejos, oclusiones o cambios bruscos de iluminación, condiciones habituales en entornos espaciales (Schönberger and Frahm, 2016).

Aunque el SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) visual permite estimar la trayectoria del sensor y una representación del entorno, suele compartir con SfM (Structure from Motion) la dependencia de textura, iluminación estable y correspondencias visuales robustas. Por ello, para obtener modelos 3D densos y fiables resulta necesario evaluar técnicas específicas de reconstrucción, como NeRF (Mildenhall et al., 2021), 3D Gaussian Splatting (Kerbl et al., 2023) o NeuS, sujetas a retos de coste computacional, calidad de poses, cobertura visual y fiabilidad geométrica.

La percepción multimodal constituye otra vía para aumentar la robustez del sistema. En particular, la imagen térmica puede aportar información complementaria a la visión RGB cuando las condiciones de iluminación o las propiedades físicas de los materiales dificultan la interpretación visual. Aunque trabajos como Castilla-Arquillo et al. (2024) se centran en la evaluación de suelos bajo condiciones marcianas simuladas, muestran el interés de incorporar sensores térmicos en sistemas robóticos espaciales cuando la información visible no resulta suficiente por sí sola.

Finalmente, la planificación de trayectorias es esencial para adquirir datos multivista de forma autónoma. Herramientas como MoveIt (Coleman et al., 2014) permiten resolver la cinemática inversa, planificar trayectorias y comprobar colisiones en manipuladores robóticos. No obstante, su integración en tareas de inspección requiere abordar también la selección de puntos de vista, la orientación del sensor, la cobertura visual y la asociación de cada captura con la pose del robot. En esta línea, trabajos como (Paz-Delgado et al., 2023) muestran el interés de combinar planificación avanzada con restricciones cinemáticas, dinámicas y objetivos de reconstrucción tridimensional.

A partir de este análisis, se identifica la necesidad de plataformas experimentales que integren percepción multimodal, calibración, planificación de puntos de vista, adquisición robótica de datos y reconstrucción 3D. Frente a traba-

jos centrados en objetivos cooperativos, interfaces estandarizadas o demostraciones aisladas, este trabajo propone un sistema orientado a la adquisición autónoma de datos multivista para la inspección de estructuras espaciales sin depender de marcadores para la planificación del movimiento.

3. Metodología

La metodología propuesta se basa en el desarrollo de una plataforma experimental para la inspección autónoma de estructuras espaciales mediante un manipulador robótico equipado con un sistema de percepción multimodal. Todo el sistema se ha implementado sobre ROS 2, integrando la adquisición de datos, la gestión de transformadas, la planificación de movimiento y la comunicación entre los distintos módulos del sistema.

3.1. Arquitectura general del sistema

La arquitectura desarrollada combina un brazo manipulador Kinova Gen 2 de 7 grados de libertad con un conjunto de sensores montados sobre su efector final. En concreto, se ha diseñado e integrado un soporte impreso en 3D que permite alojar una cámara RGB-D Intel RealSense D435i, una cámara térmica Optris PI Imager y un sensor LiDAR 2D RPLIDAR S3, como se muestra en la Figura 1.

El flujo de inspección se organiza en varias etapas. En primer lugar, se realiza la calibración del sistema sensor-robot para conocer la relación geométrica entre el efector final y la cámara empleada en la reconstrucción. A continuación, se lleva a cabo una percepción inicial del entorno mediante LiDAR, que permite delimitar el volumen de interés de la estructura. A partir de esta información, el sistema genera puntos de inspección y planifica trayectorias libres de colisiones para situar el sensor en cada punto de vista. Finalmente, en cada posición se capturan los datos visuales junto con la pose del robot, permitiendo su posterior uso en métodos de reconstrucción tridimensional.

Además, se ha desarrollado un gemelo digital en Gazebo para validar estrategias de exploración, comprobar autocolisiones y ensayar trayectorias antes de su ejecución sobre la plataforma real.

3.2. Integración y calibración Eye-in-Hand

Para que la etapa de reconstrucción 3D posterior funcione correctamente, es necesario conocer la transformación geométrica estática entre el sistema de coordenadas del efector final y el centro óptico de la cámara empleada para la reconstrucción. Para resolver este problema de calibración, formulado habitualmente mediante la ecuación $AX = XB$, se estima la transformación fija X entre el efector final del robot y la cámara. En esta expresión, A representa el movimiento relativo del efector final entre dos poses, mientras que B representa el movimiento relativo observado por la cámara respecto al marcador de calibración. Para estimar esta transformación se llevó a cabo un proceso de calibración *Eye-in-Hand* utilizando el paquete *easy_handeye* (Esposito et al., 2017).

Durante este proceso, el manipulador se desplazó por distintas poses conocidas frente a un marcador fiduciario ArUco (Garrido-Jurado et al., 2014). A partir de estas observaciones,

se aplicó el método de optimización sobre el grupo euclídeo de Park (Park and Martin, 1994) para estimar la transformación entre el efector final y la cámara. La matriz resultante se incorporó al árbol de transformadas del robot (*TF tree*), permitiendo conocer la pose del sensor durante todo el proceso de adquisición.

Es importante señalar que el marcador ArUco se emplea únicamente durante la etapa de calibración *Eye-in-Hand*. La planificación de la inspección y la adquisición de datos no dependen de marcadores instalados sobre la estructura inspeccionada.



Figura 1: Integración de los sensores multimodales en el efector final del brazo Kinova Gen 2.

3.3. Percepción LiDAR y estimación inicial del volumen de inspección

Antes de capturar las imágenes, el manipulador ejecuta una trayectoria de barrido inicial con el LiDAR 2D. Al sincronizar las lecturas con la odometría del brazo, se genera una nube de puntos tridimensional del entorno. Posteriormente, se aplica un filtrado espacial para eliminar suelo, techo y ecos a distancias superiores a 2 m. La nube resultante se procesa con Open3D (Zhou et al., 2018) para extraer un *bounding box* aproximado de la estructura, que se utiliza como entrada para la generación de puntos de inspección.

3.4. Pipeline de inspección autónoma y adquisición de datos

A partir de las dimensiones y coordenadas del *bounding box* extraído, un algoritmo genera de forma procedimental una constelación de puntos de inspección (*waypoints*) distribuidos alrededor de la estructura, como se muestra en la Figura 3. Para maximizar la calidad del muestreo, la cinemática inversa calcula la orientación de cada punto forzando que el eje óptico de la cámara apunte directamente hacia el centroide de la caja envolvente.

Una vez definida la malla espacial de captura, la orquestación del movimiento se delega a MoveIt (Coleman et al., 2014). Este entorno de planificación se encarga de resolver las trayectorias entre los distintos *waypoints*, garantizando movimientos fluidos y estrictamente libres de colisiones tanto con el entorno como con el propio cuerpo del robot (*self-collision checking*).

En cada punto de inspección, el robot se detiene para evitar *motion blur* y captura de forma sincronizada la imagen RGB y térmica. En la versión actual del sistema, la reconstrucción tridimensional se realiza empleando la imagen RGB y la pose asociada, mientras que la captura térmica queda registrada

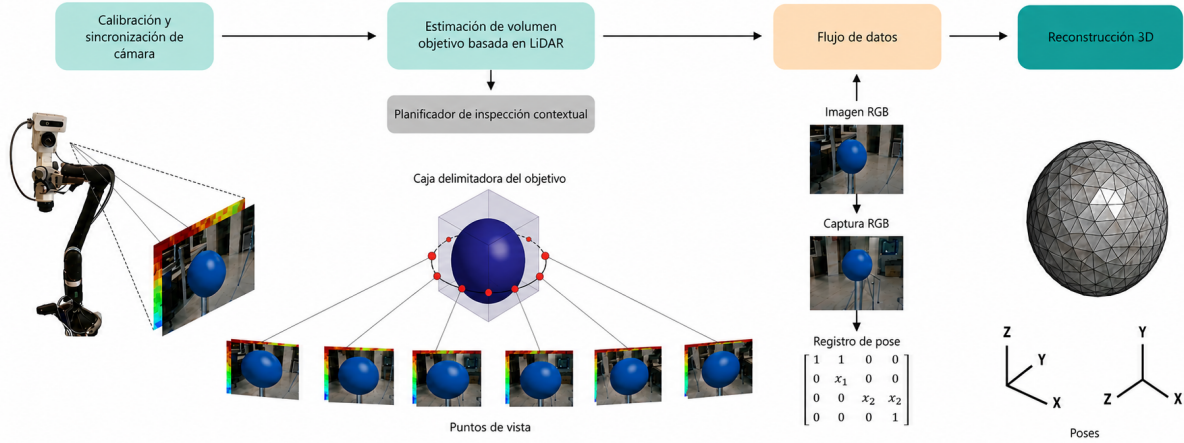


Figura 2: Descripción genérica del pipeline de inspección diseñado.

para su integración en etapas posteriores de inspección multimodal. El *pipeline* guarda automáticamente la fotografía en un directorio estructurado y, simultáneamente, extrae del árbol de transformadas de ROS 2 la pose exacta de la cámara (cuaternión de orientación y vector de traslación), almacenándola en un archivo JSON. Este proceso iterativo conforma un conjunto de datos perfectamente etiquetado, sentando las bases idóneas para alimentar arquitecturas de reconstrucción volumétrica como NeRF o *3D Gaussian Splatting*.

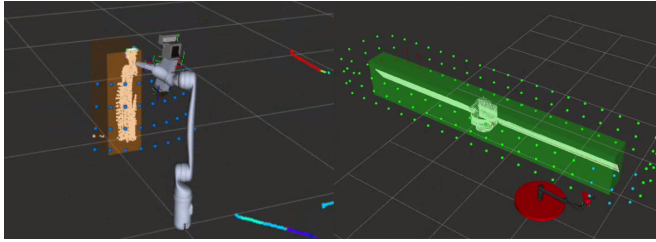


Figura 3: Puntos de inspección alrededor de la estructura a analizar en físico (izq) y en entorno virtual (der), vistos desde rviz.

3.5. Selección del método de reconstrucción 3D

Como etapa complementaria al desarrollo del sistema de inspección, se realizó una evaluación previa de diferentes técnicas de reconstrucción 3D con el objetivo de seleccionar el método más adecuado para su integración en la arquitectura de inspección autónoma. Para ello, se analizaron enfoques representativos de distintas familias: COLMAP (Schönberger and Frahm, 2016), como método fotogramétrico clásico basado en *Structure-from-Motion* y *Multi-View Stereo*; CasMVSNet (Gu et al., 2020), como red profunda de *Multi-View Stereo* basada en volúmenes de coste en cascada; MAST3R (Leroy et al., 2024), como método reciente basado en correspondencias densas; NeRF (Mildenhall et al., 2021), evaluado mediante la implementación Nerfacto disponible en Nerfstudio (Tancik et al., 2023); *3D Gaussian Splatting* (Kerbl et al., 2023), evaluado mediante Splatfacto dentro del mismo framework; y NeuS (Wang et al., 2021), como método basado en superficies implícitas. Además de la fidelidad geométrica y fotométrica, estos métodos resultan de interés por su capacidad para sintetizar nuevas vistas de la escena desde posiciones no capturadas

originalmente, lo que puede ser útil para completar la inspección visual de zonas no observadas directamente durante la adquisición.

La evaluación preliminar permitió comparar la estabilidad, la calidad visual y la coherencia geométrica de las reconstrucciones obtenidas, seleccionando el método con mejor compromiso entre precisión, robustez y viabilidad de integración con el sistema robótico. De esta forma, las reconstrucciones mostradas en los experimentos no se plantean como una comparativa exhaustiva entre todos los algoritmos, sino como la aplicación del método seleccionado al contexto de inspección autónoma propuesto.

A partir de esta evaluación, Nerfacto fue seleccionado como método principal para las reconstrucciones mostradas en los experimentos, al ofrecer un compromiso adecuado entre calidad visual, estabilidad y facilidad de integración en el banco de pruebas desarrollado, como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1: Evaluación cualitativa de métodos de reconstrucción 3D.

Método	Calidad visual	Coherencia geométrica	Integración
COLMAP	Media	Media-Alta	Alta
CasMVSNet	Media	Media	Media
MASt3R	Alta	Media	Media
NeuS	Media	Media-Alta	Baja
Splatfacto	Alta	Media	Alta
Nerfacto	Alta	Media-Alta	Alta

4. Experimentos y resultados

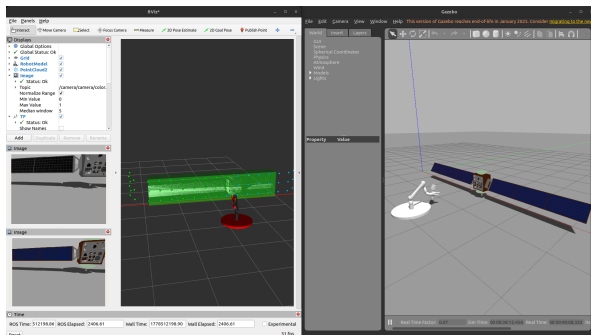
Para validar la metodología de inspección robótica autónoma propuesta, se ha diseñado un marco experimental dual. Este enfoque combina un entorno de simulación de alta fidelidad con pruebas en un entorno físico real, lo que permite evaluar la robustez de los algoritmos bajo distintas condiciones y restricciones cinemáticas.

4.1. Experimento 1: Inspección virtual con base holonómica

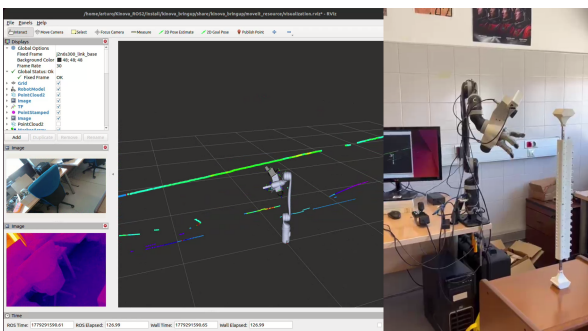
El primer experimento se llevó a cabo en el simulador Gazebo, donde se desplegó una estructura satelital de grandes dimensiones. En este entorno se empleó un modelo virtual del manipulador Kinova Gen 2 (Kinova Robotics, 2025) montado sobre una base móvil holonómica, como se muestra en la Figura 4(a).

El uso de una base holonómica no pretende reproducir de forma directa la dinámica completa de un satélite en órbita, sino aproximar el tipo de movilidad relativa que puede ensayarse en bancos de pruebas terrestres de microgravedad plana, como el Laboratorio de Robótica Orbital de la Agencia Espacial Europea. En este tipo de instalaciones, el movimiento del sistema se restringe a un plano, permitiendo estudiar estrategias de aproximación, inspección y cobertura alrededor de una estructura en condiciones representativas de microgravedad bidimensional. Por ello, la base holonómica empleada en simulación permite validar el flujo de percepción, planificación y adquisición de datos en un escenario coherente con los ensayos experimentales previstos.

Ante el desconocimiento a priori de la geometría del satélite, el sistema aplicó la estrategia de exploración basada en barridos LiDAR descrita anteriormente. La planificación de trayectorias se coordinó para gestionar la redundancia cinemática de la base móvil y el brazo articulado, garantizando movimientos seguros y libres de colisión. El resultado fue una cobertura perimetral completa (360°) de la estructura y una captura de datos RGB-D sincronizada. A partir de la evaluación previa de métodos de reconstrucción, se empleó Nerfacto para procesar el conjunto de imágenes generado durante la inspección virtual. La reconstrucción obtenida permitió comprobar visualmente la coherencia del conjunto de datos capturado, así como la correcta distribución de los puntos de vista alrededor de la estructura, como se muestra en la Figura 5(a).



(a) Entorno virtual (Gazebo).



(b) Entorno físico.

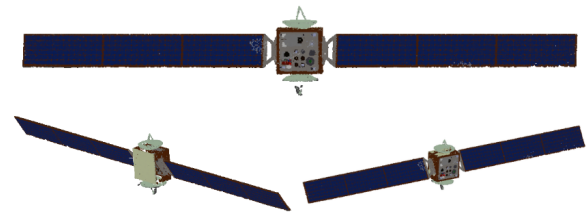
Figura 4: Experimentos realizados en las pruebas preliminares de inspección. El vídeo de la realización de ambos experimentos puede verse en <https://youtu.be/Z71u1NtoA1w>.

4.2. Experimento 2: Validación física con base estática

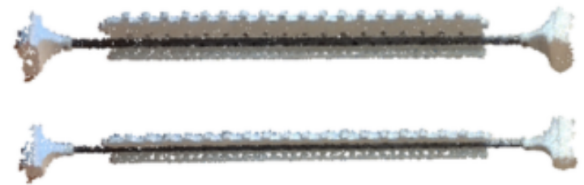
El segundo ensayo trasladó la arquitectura de software al hardware físico del laboratorio para inspeccionar una estruc-

tura vertical. En este escenario, el brazo robótico operó desde un anclaje estático, lo que impuso restricciones de movilidad severas al carecer de una base traslacional, como se muestra en la Figura 4(b). En consecuencia, la resolución de la cinemática inversa, la elusión de singularidades y la planificación de los movimientos entre los puntos de interés se delegaron al framework de manipulación MoveIt (Coleman et al., 2014).

A pesar de estas limitaciones de alcance y de la presencia de ruido sensorio y lumínico propio del mundo real, el algoritmo fue capaz de abstraer la geometría del objeto, calcular puntos de inspección viables dentro de su espacio de trabajo y ejecutar una captura automatizada que abarcó aproximadamente 120° de la estructura frontal. Como se puede observar en la Figura 5(b), la reconstrucción 3D obtenida a partir de los datos físicos permitió comprobar la validez de la calibración *Eye-in-Hand* y la coherencia espacial de las poses registradas, confirmando que el sistema puede generar conjuntos de datos adecuados para la obtención de modelos tridimensionales incluso bajo configuraciones cinemáticas limitadas.



(a) Entorno virtual (Gazebo).



(b) Entorno físico.

Figura 5: Resultados de reconstrucción 3D obtenidos con Nerfacto a partir de las imágenes RGB y sus poses registradas en ambos experimentos.

4.3. Discusión

La comparativa entre ambos ensayos confirma la viabilidad operativa de las etapas iniciales de inspección, captura de datos y reconstrucción 3D de la arquitectura desarrollada. Mientras que la simulación demostró el potencial del sistema para alcanzar coberturas completas mediante la acción coordinada de una base holonómica y un brazo robótico en condiciones orbitales bidimensionales simuladas, la experimentación física permitió validar la integración sensorial y la fiabilidad de la adquisición de datos frente a las perturbaciones del entorno real.

Asimismo, las reconstrucciones obtenidas muestran que las imágenes RGB y las poses registradas por el sistema son suficientemente coherentes para alimentar métodos de reconstrucción 3D basados en vistas múltiples, mientras que la captura térmica sincronizada abre la posibilidad de extender el banco de pruebas hacia inspección multimodal.

5. Conclusiones y trabajos futuros

La presente investigación ha culminado en el desarrollo y validación de las etapas iniciales de una arquitectura de inspección robótica autónoma orientada a grandes estructuras espaciales en órbita. Entre las principales aportaciones destaca el diseño y la integración mecánica de un sistema de percepción multimodal compuesto por una cámara RGB-D, una cámara térmica y un sensor LiDAR sobre el efector final del manipulador Kinova Gen 2. Asimismo, se ha construido un gemelo digital de alta fidelidad en Gazebo que ha permitido ensayar las estrategias de exploración y la prevención de autocolisiones de forma segura.

La validación experimental ha demostrado la capacidad del sistema para reconocer topologías a priori desconocidas, generar puntos de inspección y ejecutar trayectorias de captura de datos de forma robusta. Además, la evaluación previa de distintas técnicas de reconstrucción 3D ha permitido seleccionar el método más adecuado para su integración en el banco de pruebas, posibilitando la generación de modelos tridimensionales a partir de los datos adquiridos. Los resultados muestran que la arquitectura propuesta constituye una base viable para cerrar el ciclo completo de inspección autónoma, desde la planificación de la captura hasta la reconstrucción tridimensional de la estructura, y para implementar posteriormente algoritmos de diagnóstico basados en dichas reconstrucciones.

Como objetivo futuro, se plantea la integración y validación del sistema de inspección en el Laboratorio de Robótica Orbital de la Agencia Espacial Europea (ESA), lo que permitirá superar las limitaciones actuales del laboratorio propio y operar en condiciones de microgravedad bidimensional simulada. Adicionalmente, se propone evolucionar hacia modelos de renderizado fotorrealista más eficientes como *3D Gaussian Splatting* (Kerbl et al., 2023), así como implementar estrategias de adaptación geométrica directa sobre la nube de puntos y rutinas de inspección local de alta resolución para el diagnóstico autónomo y detallado de posibles anomalías estructurales.

Por último, aunque la reconstrucción 3D presentada en este trabajo se ha realizado a partir de imágenes RGB, la arquitectura desarrollada permite registrar información térmica sincronizada, abriendo la posibilidad de generar en el futuro modelos multimodales que combinen geometría, apariencia visual e información térmica de la estructura inspeccionada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo de la Agencia Espacial Europea (ESA) y Sirin Orbital Systems como parte del proyecto de colaboración ECHO2: End-to-End Control for Handling Operations in Orbit (4000148370/25/NL/GLC).

Referencias

- Castilla-Arquillo, R., Mandow, A., Pérez-del Pulgar, C. J., Álvarez Llamas, C., Vadillo, J. M., Laserna, J., 2024. Thermal Imagery for Rover Soil Assessment Using a Multipurpose Environmental Chamber Under Simulated Mars Conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 73, 1–12.
DOI: 10.1109/TIM.2023.3346528
- Coleman, D., Şucan, I. A., Chitta, S., Correll, N., may 2014. Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a MoveIt! Case Study. *Journal of Software Engineering for Robotics* 5 (1), 3–16.
DOI: 10.6092/JOSER.2014.05.01.p3
- Deremetz, M., Debroise, M., Boitte, R., De Stefano, M., Mishra, H., Brunner, B., 2023. MIRROR-a modular and relocatable multi-arm robot demonstrator for on-orbit large telescope assembly. In: 17th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation.
- Esposito, M., Xin, R., Bihlmaier, A., G. Viedma, E., 2017. easy_handeye: A ROS package for intuitive hand-eye calibration. Repositorio de GitHub. Consultado el 25 de febrero de 2026.
URL: https://github.com/IFL-CAMP/easy_handeye
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., Marín-Jiménez, M. J., 2014. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* 47 (6), 2280–2292.
DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005
- Gu, X., Fan, Z., Zhu, S., Dai, Z., Tan, F., Tan, P., 2020. Cascade Cost Volume for High-Resolution Multi-View Stereo and Stereo Matching. In: 2020 IEEE/CVF Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 2492–2501.
DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00257
- Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkühler, T., Drettakis, G., et al., 2023. 3D Gaussian Splatting for real-time radiance field rendering. *ACM Trans. Graph.* 42 (4), 139–1.
- Kinova Robotics, 2025. Gen2 robots. Consultado el 2 de febrero de 2026.
- Leroy, V., Cabon, Y., Revaud, J., 2024. Grounding image matching in 3d with mast3r. In: ECCV. Springer, pp. 71–91.
- Letier, P., Yang, X., Deremetz, M., et al., 2019. MOSAR: Modular Spacecraft Assembly and Reconfiguration Demonstrator. In: 15th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation.
- Martínez-Petersen, A., Gerdes, L., Rodríguez-Martínez, D., Pérez-del Pulgar, C. J., 2026. High-fidelity 3D reconstruction for planetary exploration. In: IEEE Conference on Artificial Intelligence (CAI). IEEE, Granada, Spain.
DOI: 10.48550/arXiv.2602.13909
- Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., Ng, R., 2021. Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Communications of the ACM* 65 (1), 99–106.
- Park, F., Martin, B., 1994. Robot sensor calibration: solving $AX=XB$ on the Euclidean group. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 10 (5), 717–721.
DOI: 10.1109/70.326576
- Paz-Delgado, G. J., Pérez-del Pulgar, C. J., Azkarate, M., Kirchner, F., García-Cerezo, A., 2023. Multi-stage warm started optimal motion planning for over-actuated mobile platforms. *Intelligent Service Robotics* 16, 247–263.
DOI: 10.1007/s11370-023-00461-x
- Roa, M. A., Beyer, A., Rodríguez, I., Stelzer, M., de Stefano, M., Lutze, J.-P., Mishra, H., Elhardt, F., Grunwald, G., Dubanchet, V., et al., 2024. Eross: In-orbit demonstration of European robotic orbital support services. In: 2024 IEEE Aerospace Conference. IEEE, pp. 1–9.
- Roa Garzon, M. A., Koch, C., Rognant, M., Ummel, A., Letier, P., Turetta, A., Lopez, P., Trinh, S., Rodríguez Brena, I. V., Nottensteiner, K., et al., 2022. PULSAR: Testing the technologies for on-orbit assembly of a large telescope. In: 16th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation. ESA.
- Schönberger, J. L., Frahm, J.-M., 2016. Structure-from-Motion Revisited. In: 2016 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. pp. 4104–4113.
DOI: 10.1109/CVPR.2016.445
- Tancik, M., Weber, E., Ng, E., Li, R., Yi, B., Wang, T., Kristoffersen, A., Austin, J., Salahi, K., Ahuja, A., et al., 2023. Nerfstudio: A modular framework for neural radiance field development. In: ACM SIGGRAPH 2023.
DOI: 10.1145/3588432.3591516
- Tsai, R., Lenz, R., 1989. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5 (3), 345–358.
DOI: 10.1109/70.34770
- Wang, P., Liu, L., Liu, Y., Theobalt, C., Komura, T., Wang, W., 2021. NeuS: learning neural implicit surfaces by volume rendering for multi-view reconstruction. In: 35th International Conference on Neural Information Processing Systems.
DOI: 10.5555/3540261.3542342
- Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (11), 1330–1334.
DOI: 10.1109/34.888718
- Zhou, Q.-Y., Park, J., Koltun, V., 2018. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. *arXiv:1801.09847*.